

# レーザー衝撃圧縮による氷惑星内部の実際の温度圧力条件での水の状態解析

奥地拓生

岡山大学惑星物質研究所

## はじめに

水(H<sub>2</sub>O)は宇宙に最も大量に存在する固体の一つである。太陽系内外の惑星系には、このような固体が集合してできた「氷惑星」が数多く存在している。その代表的な例が、太陽系の惑星のなかで最も外側に存在する、天王星と海王星である(図1)。

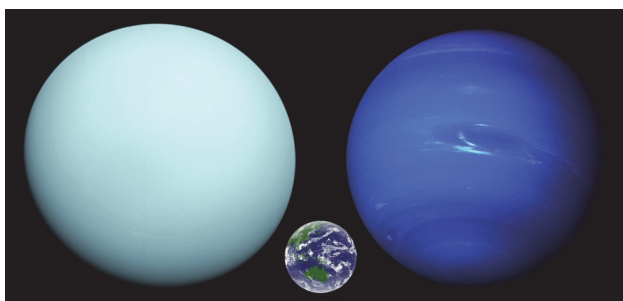


図1. ボイジャー2号により撮影された天王星(左)と海王星(右)。ともに地球の4倍の直径を持つ、巨大な氷惑星である(NASA)。

これらの氷惑星の周囲や内部には、低温から超高温、真空から超高压に至るまでの多様な環境が存在しており、そこでは氷物質(H<sub>2</sub>Oおよびその混合物)が多様な物性を示すことができると考えられている。天王星と海王星は、地球の4倍の大きさで15~17倍の質量を持ち、それらの主成分は、水に少し炭素と窒素が混じったものである。両惑星の内部は800万気圧、8000 Kにも達する高い温度と圧力の世界になっている。1980年に天王星と海王星に相次いで到達したNASAの探査機・ボイジャー2号の活躍により、これらの氷惑星が、地球の数十倍の強さの磁場を発生する源を内部に持つことが明らかにされた。このような強い磁場が作られるためには、氷惑星の内部を強い電流が流れていることが必要である。しかし、氷惑星の主成分は、電気をあまり通さない物質であり、惑星内部に電気伝導をもたらす物質の正体が謎のままであった。

高温高压の条件では、H<sub>2</sub>Oの化学的な反応性が劇的に上昇することから、物質の静的な圧縮用に開発されたダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた圧縮と加熱による氷物質の計測が試みられてきたものの、氷惑星の内部の再現には至っていなかった。その一方で、レーザー衝撃圧縮法では、試料の圧縮、加熱、計測をほぼ同時に行うために、水の高い反応性が引き起こす、容器などとの反応の問題を完全に回避することができる。そこで、我々はこの手法に

よって、惑星内部に存在する多様な氷物質の状態を、高温高压その場で解析する研究を進展させてきた。これまでに、純粋なH<sub>2</sub>Oの液体および、H<sub>2</sub>Oを主成分として炭素や窒素を少し含む混合液体の試料に対して、衝撃圧縮条件下での密度や光反射率の系統的な計測に成功しており、上記の電気伝導の謎の解明にも繋がる成果を得てきた[1](図2)。

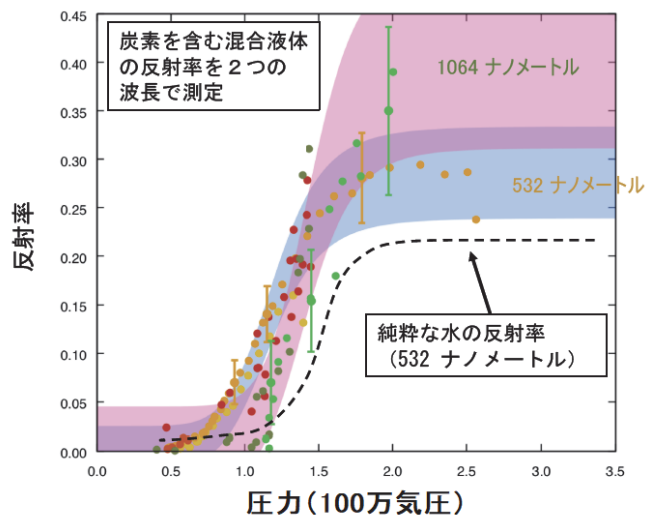


図2. レーザーで衝撃圧縮された純粋なH<sub>2</sub>Oと、炭素を含む混合液体の光反射率。圧力と共に反射率が上昇することから、氷惑星内部物質は金属状態だと考えられる(2020. 7. 12 岡山大・大阪大プレスリリースより転載)。

このように、レーザー衝撃圧縮は氷惑星内部の物質の研究に対して特に有効な手法になったと考えられるが、柔らかくて軽いH<sub>2</sub>O試料は圧縮されやすく、その際に温度が上がりすぎてしまう問題が、依然として残されている。これまでのH<sub>2</sub>Oの衝撃圧縮実験の研究では、ガス銃、レーザー、Zマシンなどの手法に共通して、比較的高温の状態のみが計測されてきた。例えば、純粋なH<sub>2</sub>Oを常温と常圧の状態から圧縮する、いわゆる基本ユゴニオ条件の下では、圧力が約50GPaで既に天王星や海王星の内部の温度に届いてしまう。それ以上の圧力にまで圧縮を進めると、上記の図2の結果も含めて、惑星内部よりも高温の状態についての計測結果が得られることになる。我々の研究目的を最終的に達成するためには、この基本ユゴニオ条件よりも氷惑星内部の条件に近い低温側の圧縮状態を実現することが、特に重要な課題として残されていた。

## 実験手法

ダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた予備圧縮の手法を用い、高密度化した出発試料をさらにレーザー衝撃圧縮することで、基本ユゴニオ条件よりも温度を下げるができる。我々はこの予備圧縮法を用いた実験をこれまで継続的に実施してきたが[2]、温度上昇の問題を十分に解決することはできていなかった。そこで DAC を用いた予備圧縮の手法を、常圧の密度が高い重水の試料に対して応用することで、従来の  $\text{H}_2\text{O}$  の結果よりもさらに低温の条件を達成する。重水( $^2\text{H}_2\text{O}$ )・重酸素重水( $^2\text{H}_2^{18}\text{O}$ )をそれぞれ DAC で圧縮することで高密度・高インピーダンスの試料を作成した上で、それらを衝撃圧縮することで、温度上昇をより効率的に抑制する。激光 XII 号レーザーの出力は DAC の圧縮に対して十分なものではないので、試料を十分に圧縮するためには、ダイヤモンドアンビルの厚みに関する厳しい制約も生じる。その制約の下で 0.5~0.7 GPa に至る予備圧縮圧力を達成しており、重水試料群の初期密度を、常圧の軽水の 1.3~1.4 倍にまで上昇させることが可能と考えられる。

このターゲットに高強度レーザーを照射してその内部に衝撃波を発生させ、反射面の進行速度、つまり衝撃波速度の時間変化を、タイミングを同期させた VISAR (速度干渉計) で計測した。Qz を標準物質に用いたインピーダンスマッチングにより、試料の圧力・密度が決定できる[3]。また VISAR の反射光強度から波長 532nm での反射率を計測して、試料の電離状態の情報を得ることができる。さらに SOP (輝度温度計測) によって試料温度を計測して、各組成および各温度圧力条件における状態方程式と反射率を決定できる。以上の結果を総合して、惑星内部の温度圧力領域における氷物質の、密度と電離状態を捉える。昨年度までに、軽水の基本ユゴニオより 2000K 以上も低温であり、惑星内部の実際の条件にかなり近い計測を、重水を試料として行うことに成功している。今年度はデータ数の蓄積と、重酸素重水を試料とした計測を目指した。

## 結果例

図 3 に今年度の実験によって得られた、重酸素重水の予備圧縮試料についての計測の例を示す。昨年度の報告書に記載したとおり、詳細な DAC ターゲット構成要素の改良を積み重ねた結果、データの品質をさらに向上させることができた。現在これらのデータを解析中であり、過去に得られた結果との統合を進めている。

## まとめ

これまでに得られた結果からは、惑星内部では水は単純に金属化するのではなく、自由電子が熱的に励起される半導体となって、光反射率が強い温度依存性を持つようになる可能性が強く示唆されている。高温高压の重水の性質は、核融合実験の潜在的試料の評価に繋がる意義もある。以上の展開を踏まえて、今後も激光 XII 号レーザーの特色を活かした計測を継続・発展させてゆきたい。

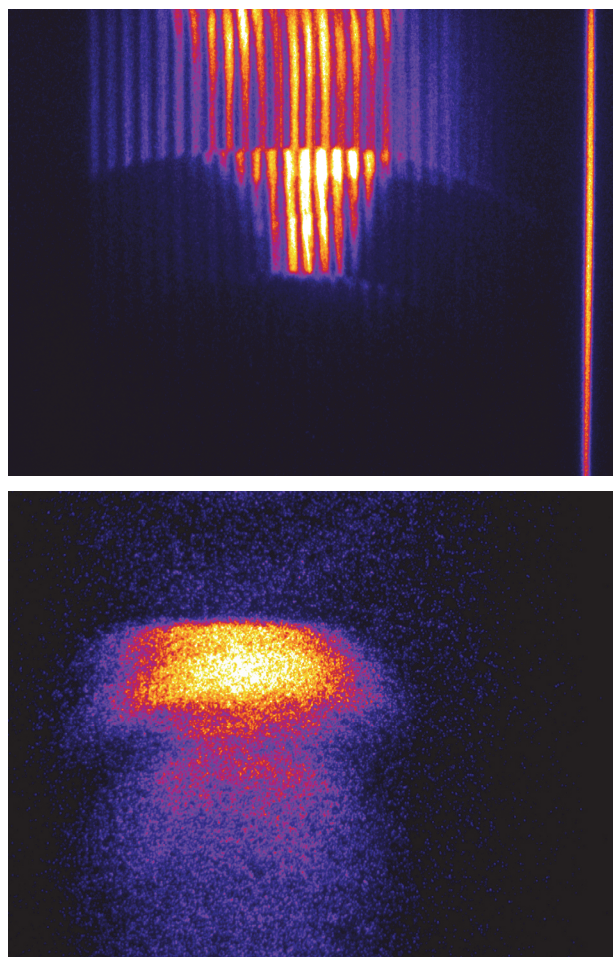


図 3. 重酸素重水の VISAR 計測結果の例(上)と SOP 計測結果の例(下)。掃引時間はいずれも 20 ns。衝撃波がレーザー側ダイヤモンド、Qz、試料、計測側ダイヤモンドを通過する時間がいずれも鮮明に記録されており、高精度の解析が可能である。

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省 X 線自由電子レーザー重点戦略課題“XFEL とパワーレーザーによる新極限物質材料の探索”、日本学術振興会科学研究費補助金(No. 17H01172)、および Quantum Leap Flagship Program (JPMXS0118067246)の助成を受けて行われました。

## 参考文献

- [1] M. Guarguaglini, J.-A. Hernandez, T. Okuchi, P. Barroso, et al., Laser-driven shock compression of “synthetic planetary mixtures” of water, ethanol, and ammonia, *Sci. Rep.*, 9, 10155 (2019).
- [2] T. Kimura, N. Ozaki, T. Sano, T. Okuchi, et al., P-rho-T measurements of  $\text{H}_2\text{O}$  up to 260 GPa under laser-driven shock loading, *J. Chem. Phys.*, 142, 164504 (2015).
- [3] N. Ozaki, T. Sano, M. Ikoma, K. Shigemori, et al., Shock Hugoniot and temperature data for polystyrene obtained with quartz standard, *Phys. Plasmas*, 16, 062702 (2009).